Primljen / Received: 5.3.2012.
Ispravljen / Corrected: 11.5.2012.
Prihvaćen / Accepted: 19.6.2012.
Dostupno online / Available online: 16.7.2012.

Konstrukcija novog putničkog terminala zagrebačkog aerodroma

Autori:

[1]Akademik prof. Branko Kincl, dipl.ing.arh.
kincl@kincl.com.hr

[1]Akademik prof.dr.sc. Velimir Neidhardt, dipl.ing.arh.
velimir.neidhardt@zg.t-com.hr

[2]Prof.dr.sc. Jure Radić, dipl.ing.građ.
jradic@grad.hr

[2]Dr.sc. Anđelko Vlašić, dipl.ing.građ.
vlasic@grad.hr

[2]Mr.sc. Nijaz Mujkanović dipl.ing.građ.
nijaz@grad.hr

[1]Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet
[2]Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

Stručni rad

Branko Kincl, Velimir Neidhardt, Jure Radić, Anđelko Vlašić, Nijaz Mujkanović

Konstrukcija novog putničkog terminala zagrebačkog aerodroma

Na međunarodnom natječaju koji je raspisala Zračna luka Zagreb pobijedilo je rješenje autora s Arhitektonskog i Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Konstrukcija i oblik rješenja zajedno su integrirani višedimenzionalnim pristupom u kojem niti jedan od čimbenika - urbanizam, ekologija, arhitektura, konstrukcija, funkcionalnost, promet - nije stavljen ispred ostalih. Glavna je zgrada aerodroma natkrivena čeličnom rešetkastom konstrukcijom fluidne forme koja se u kontinuitetu oblika proširuje u linearne, cjevaste izdanke uzdužnih putničkih komunikacija (eng. pier) sa svake strane. Zgrada terminala, zajedno s uređenim i izgrađenim okolnim prostorom, predstavlja novu liniju razvoja grada Zagreba i udruživanje s Velikom Goricom.

Ključne riječi:
aerodrom, čelična konstrukcija, rešetka, grad Zagreb, oblikovanje

Professional paper

Branko Kincl, Velimir Neidhardt, Jure Radić, Anđelko Vlašić, Nijaz Mujkanović

Passenger terminal construction at Zagreb airport

The design solution presented by authors from the Faculty of Architecture and Faculty of Civil Engineering won the first prize award at the international competition organized by the Zagreb Airport. The structure and form of this solution are integrated through multidimensional approach in which individual factors – town planning, environmental aspects, architecture, structure, functionality, and traffic – are not given precedence one over another, but are rather evaluated as a whole made of equal parts. The principal airport building is covered with a fluid steel truss structure, which continuously expands into linear, tubular passenger piers on each side. The terminal building constitutes, together with proper regulation and development of surrounding space, a new dimension of development of the city of Zagreb, and its merger with Velika Gorica.

Key words:
airport, steel structure, truss, city of Zagreb, shaping

Fachbericht

Branko Kincl, Velimir Neidhardt, Jure Radić, Anđelko Vlašić, Nijaz Mujkanović

Konstruktion des neuen Flughafenterminals des Zagreber Flughafens

Bei dem internationalen Wettbewerb, den der Flughafen Zagreb ausgeschrieben hat, hat das Projekt von Autoren von der Fakultät für Architektur und Bauwesen der Universität in Zagreb gewonnen. Das Hauptgebäude des Flughafens ist mit einer gitterförmigen, fluidartigen Stahlkonstruktion bedeckt, die sich auf jeder Seite in ihrer Fortsetzung in lineare, rohrförmige Ausläufer längsförmiger Piers erweitert. Das Terminalgebäude stellt, zusammen mit dem hergerichteten und ausgebauten umliegenden Raum, eine neue Linie der Entwicklung der Stadt Zagreb und einen Zusammenschluss mit der Stadt Velika Gorica dar.

Schlüsselwörter:
Flughafen, Stahlkonstruktion, Gitter, Stadt Zagreb, Entwurf

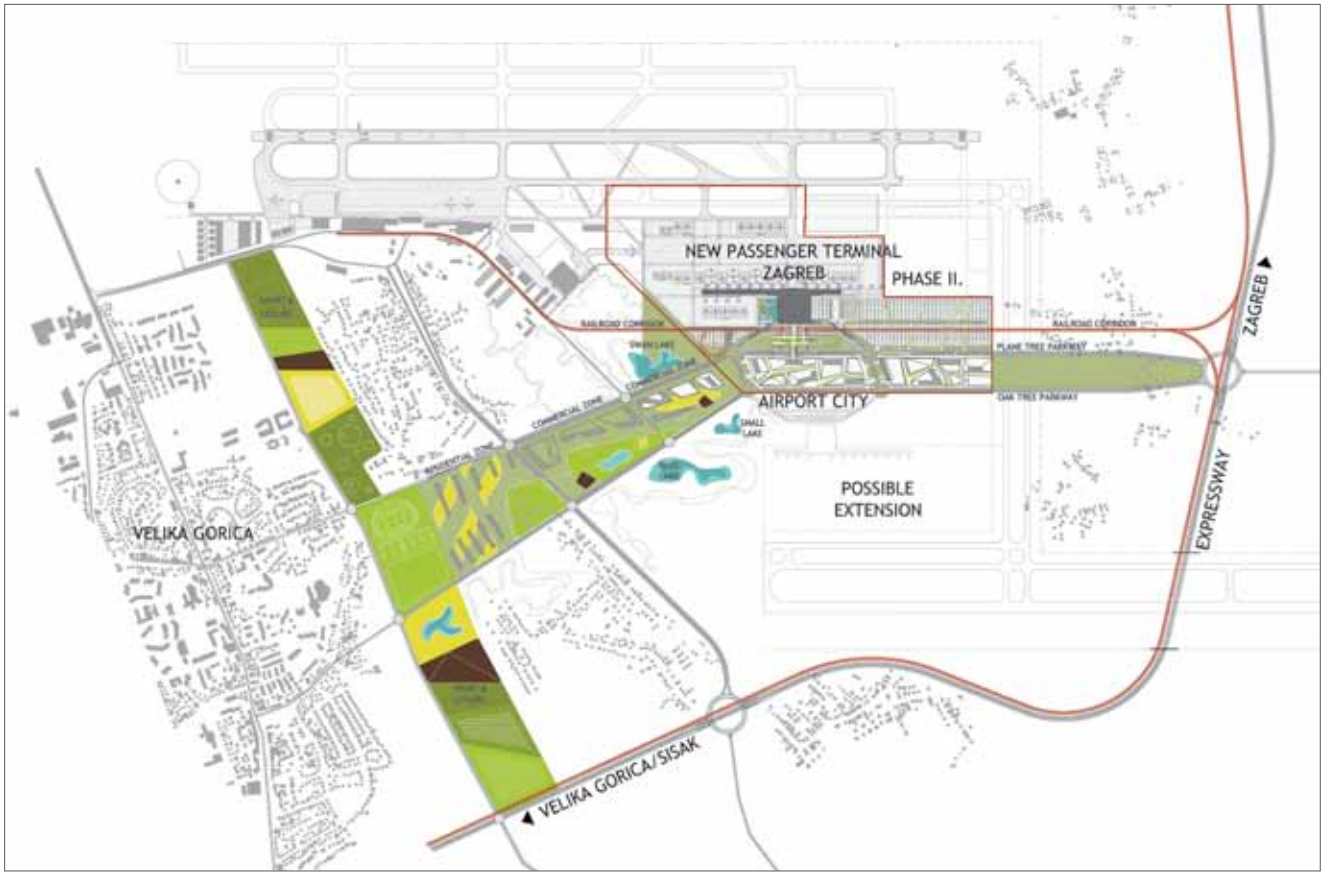
1. Urbanistički odnos grada i aerodroma

Idejno rješenje novoga putničkog terminala Zračne luke Zagreb definira novu urbanu zonu koja nastaje na sjecištu dvaju važnih prometnih pravaca grada Zagreba: jedan od njih je zagrebačka simetrala Gornji grad - Zrinjevac - Most slobode - Buzin, a drugi Heinzelova - Radnička - Domovinski most. Obje linije povezane su brzom prometnicom i dalje autocestom Zagreb - Sisak (slika 1.). Sjeverna stranica ovog urbanoga trokuta bila bi zagrebačka obilaznica koja nudi brzu povezanost s autocestama A1 i A3. Takav koncept prometne povezanosti nameće nastanak i razvoj Airport Cityja. Airport City nastaje u središtu parkovnog poteza širine 150 m koji počinje na istočnoj prometnici i završava na zapadu s velikim sportsko-rekreacijskim parkom koji je u sjecištu s drugom, okomito postavljenom sportsko parkovnom zonom. Ta je druga zona novo urbano pročelje središnjeg dijela Velike Gorice. Otvaraju se nove kvalitetne zone urbanog razvoja s trgovačkim, turističkim i sportsko-rekreacijskim zonama. Na taj način Velika Gorica postaje značajan prostorno-ekonomski čimbenik u novom prostoru širenja grada Zagreba. Takvo prožimanje s gradom Zagrebom još više dolazi do izražaja ako se uzme u obzir planirana ruta buduće zagrebačke podzemne željeznice koja bi spajala Airport City sa samim središtem Zagreba.

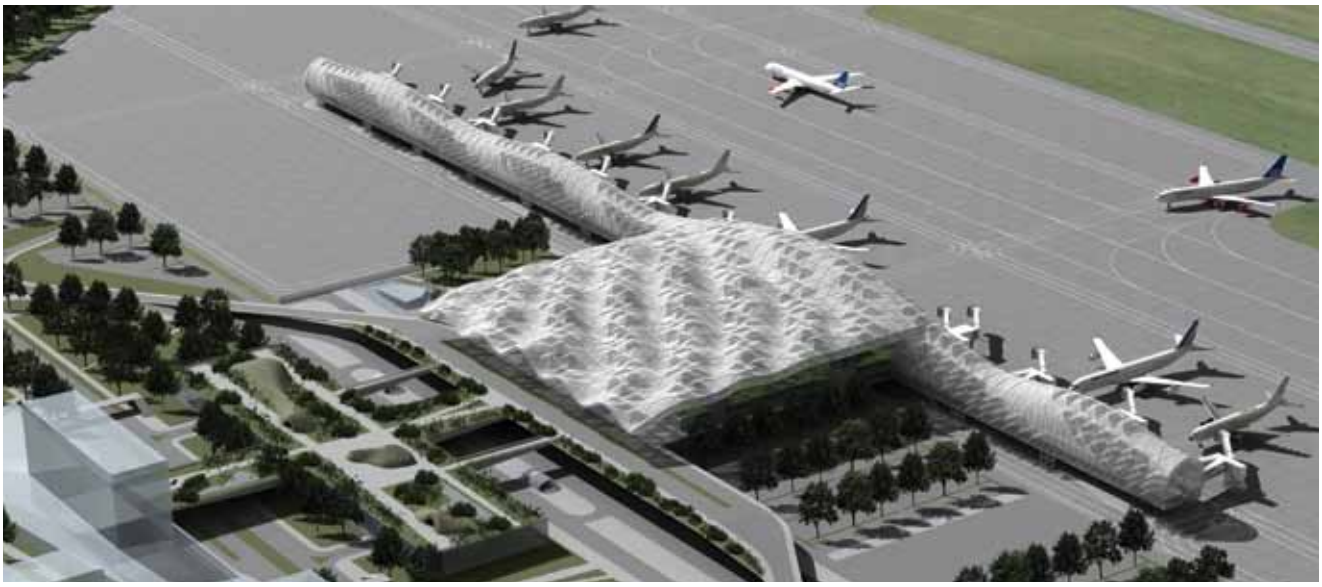
2. Stvaranje zelenog koncepta

Unatoč području u prigradskoj zoni grada Zagreba i Velike Gorice, urbanistički koncept Novog putničkog terminala zračne luke Zagreb obuhvaća prostor u smislu visoke razine urbaniteta sa značajnim površinama reprezentativnih, parkovnih poteza i prometnica. Novi orijentiri, fokusi, avenije, parkovi, linearni parkovi, sustav jezera, rekreacijske zone, pješačke oaze, staze te zeleni krovovi sjedinjuju se i stvaraju jedinstveni, urbanističko-arhitektonski koncept. Takav zeleni koncept ponavlja se kroz cijeli projekt, a pogotovo unutar novog terminala zračne luke, uključujući zelene vrtove kao značajne elemente arhitektonskog interijera. U unutrašnjosti terminala, osobito na razini restorana, zelene površine zauzimaju 2200 m^2 s prirodnim utjecajem na mikroklimu. Unutarnji se vrtovi šire prema eksterijeru i omogućuju putnicima u polasku uživanje u zelenim krovnim stazama. Domaći putnici mogu šetati po jugozapadnoj strani, a međunarodni se putnici koriste sjeveroistočnim rubom. Ove ekološke oaze, uz krovni vrt na najvišoj razini za posjetitelje, zauzimaju 4,700 m^2.

Pristupna cesta terminalu na visini +9.60 m zamišljena je na svom južnom dijelu u obliku prirodne zelene zone. Terminal je s tri vrtna mosta povezan s prostranim krovnim vrtom parkirališta te potom s hotelom koji se izdvaja kao središnja točka Airport Cityja.



Slika 1. Prostorni i prometni položaj novog terminala Zračne luke Zagreb i Airport Cityja



Slika 2. Lebdeća struktura zgrade terminala

Putnici u dolasku pri preuzimanju prtljage mogu uživati u jedinstvenom pogledu na obližnji ekološki, meditativni bazen koji je okružen zelenilom i parkom skulptura. Vodena se površina u nastavku spaja sa sustavom umjetnih jezera koja se pretapaju u šumski krajolik. Zelenilo i vodene površine harmoniziraju međuodnose fizičkih struktura i oplemenjuju cjelinu arhitektonsko-urbanističkog pristupa.

Zgrada Novog putničkog terminala projektirana je tako da može izdržati otkazivanje svih standardnih izvora napajanja energijom. U tom je slučaju napajanje energijom iz akumuliranih pričuva koje potječu iz solarne energije. Prijedlog rješenja u skladu je s međunarodnim sporazumom o smanjenju količine emisije ugljika: u Hrvatskoj je to 5 % u odnosu na razinu iz 1991. godine, uz udio od 20 % obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvodnji energije do 2020. godine.

Ekološki održivi koncept projekta temelji se na sljedećem:

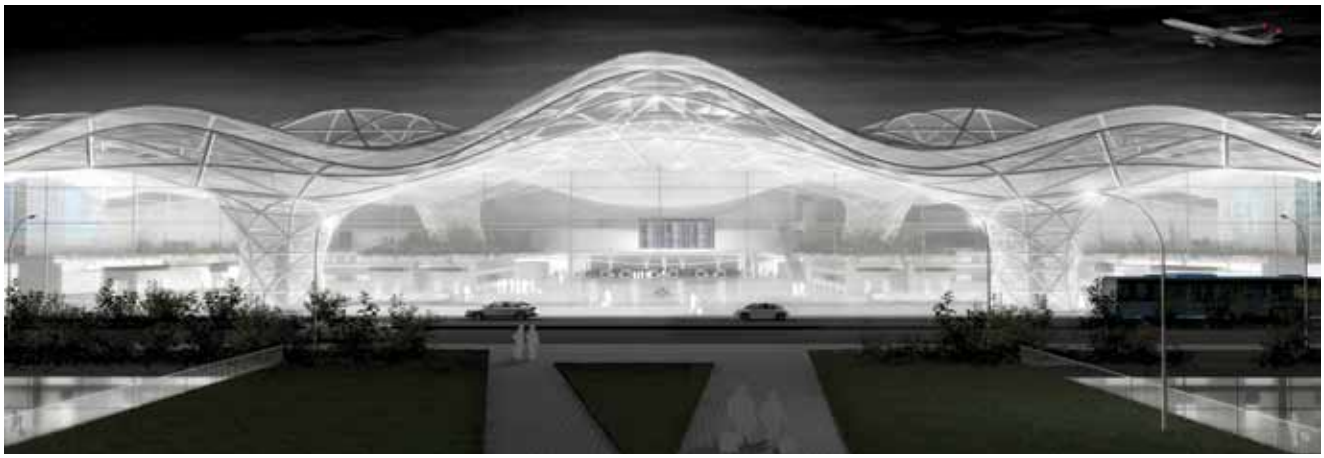
- ventilaciji pročelja i krova na principu dvoslojne envelope
- velikoj površini fotonaponskih ćelija (8.500 m^2) za ekološki prihvatljivu proizvodnju električne energije
- trigeneracijskim postrojenjima za sinergijsku proizvodnju električne energije te pripreme tople i hladne vode
- skupljanju, obradi, preradi te gospodarenju vodom iz svih dijelova kompleksa, kao što su krovovi, stajanke, uzletišta, sanitarni čvorovi itd.
- centraliziranoj kontroli i upravljanju svim energetskim i komunalnim resursima putem djelotvornih upravljačkih sustava (EMS)
- izboru najboljih tehničkih rješenja i uporabi materijala koji pridonose kvaliteti i ekološkoj održivosti
- upotrebi velikih staklenih površina i prozirnih materijala u odlaznom i dolaznom halu, kao i na linearnoj komunikaciji (pier) čime se uvode znatne količine prirodnog svjetla u unutrašnjost zgrade i štedi energija.

3. Funkcionalnost, fleksibilnost i oblikovanje

Specifična arhitektonska forma postignuta je jedinstvenim spojem estetskih i funkcionalnih fenomena te atribucija posebne simbolike i značenja.

Krov zgrade terminala dinamičan je valovite geometrije koji se otvara i levitira iznad prostora terminala, stvarajući slobodnu dinamiku strukturalne mreže: lebdeći krov – ikonički izraz krajobraza. Takva prostorna harmonija vidi se također i u interijeru terminala kroz niz različitih, funkcionalno zamišljenih estetskih atrakcija. Lebdeći krov omogućuje maksimalno izlaganje interijera te najširu moguću panoramsku orijentaciju prema pejzažu Medvednice i konturnih obrisa grada na sjeveru te Airport Cityja na jugu.Osnovna se načela projektiranja temelje na sveukupnoj racionalizaciji i transparentnosti – s ravnomjernom distribucijom funkcija te s jasnim prostornim okosnicama – kako bi se postigao savršeni obrazac orijentiranosti putnika. Neke od formalnih arhitektonskih karakteristika, posebno valovit krov, nadilaze uobičajene prostorne obrasce, no nisu lišeni strogo utilitarne uloge. Prozirni stakleni pod u središnjem odlaznom halu propušta dnevnu svjetlost do nižeg hala za prtljagu. Četiri nosive jezgre koje prihvaćaju sve horizontalne sile krova služe kao četverostrani elektronički informacijski ekrani.

Struktura lebdećeg krova projektirana je kao dvostruka membrana, a njezin veliki ventilacijski prostor pruža znatne ekološke prednosti. Postavljanjem krovnih otvora sa strane te snagom reverzibilnih mlaznih propelera u dvostrukoj membrani stvara se mikroklima unutar krova koja može dramatično smanjiti potrošnju energije unutar terminala i ljeti i zimi. Dinamična krovna struktura lebdi nad interijerom terminala i raste rasprostirući se i oblikujući oplošja linearnih izdanaka. Pročelja hala zatvorena su jednostavno oblikovanim, dvostruko ustakljenim i ventiliranim pročeljima. Primjenjen je modularni, geometrijski princip razdiobe staklenih površina, 360 x180 cm pri dnu zgrade, s gotovo dvostrukim rasterom na gornjem dijelu spoja s lebdećim krovom. Model potječe od racionalnoga modularnog



Slika 3. Pogled na konstrukciju na ulazu u zgradu terminala (noćna vizura)

planiranja, funkcionalnih sadržaja novoga putničkog terminala pri čemu je uočljiv kontrast jednostavne geometrije ulaznoga dvostrukog staklenoga pročelja prema čeličnoj sinusoidnoj liniji lebdećeg krova.

Osnovni procesi koji se odvijaju unutar predloženog terminala zračne luke, dakle primarne funkcije, uključuju usluge za putnike (odlazak, dolazak) i poslove s prtljagom putnika. Sekundarne funkcije objekta olakšavaju standardno kretanje i povećavaju ukupnu kvalitetu putničkog terminala. Funkcionalna je organizacija složena i raspodijeljena okomito kroz četiri razine. Fleksibilnost arhitektonskog oblika novoga putničkog terminala počiva na dva geometrijska sustava: dinamičnoj linearnoj strukturi prostornih izdanaka i kompaktnom tlocrtnom planu zgrade terminala.

Na linearnom je izdanku (*pieru*) fleksibilnost postignuta velikim rasponima koji su prekriveni krovnom ovojnicom. Fleksibilnost centralne zgrade terminala postiže se slobodnim tlocrtnim planom koji natkriva krovna ovojnica. Obodno su smješteni svi servisni i prateći prostori (jezgre, instalacijski kanali, sanitarije). Centralni hall slobodnim tlocrtnim planom omogućuje fleksibilnost osnovnih funkcionalnih cjelina (prijava putnika, sigurnosna provjera, provjera putovnica) vezanih za promjene putničkih tokova i njihove kapacitete (domaći – internacionalni, Schengen - non - Schengen). Prostor središnjega hala zbog povećanja prometa moguće je proširiti u smjeru prema sjeveroistoku ovisno o potrebnim kapacitetima. Fleksibilnost *piera* omogućava njegovo linearno širenje paralelno s rastom zračnog prometa i potrebnog broja aviomostova. Površina stajanke povećava se sukladno dimenzijama *piera* i planiranom broju avionskih stajanki.

Krov zgrade prostorna je rešetka tlocrtnih dimenzija 155 m x 165 m čija gornja i donja ravnina čine dvije prozirne membrane, a prostor između otvara velike mogućnosti ventilacijske izmjene zraka sa znatnom uštedom i ljeti i zimi. Dodatan efekt fluidnosti dobiven je varijabilnom visinom ove krovne rešetke, pomno prateći put prijenosa opterećenja, pa je tako njezina najveća visina na mjestima oslonaca, gdje se krovna ploha konkavno ulijeva u trubaste stupove. Takva promjenjiva zakrivljenost donje i gornje ravnine najviše je vidljiva s pročelja zgrade gdje je visina rešetke najmanja pa u potpunosti dolazi do izražaja valovitost. Dojam pri ulasku u zgradu je, dakle, energičan, a odmah nakon ulaska postaje smirujući

Slika 4. Interijer terminala na spoju zgrade i *piera*

zahvaljujući "bestežinskom stanju" koje se naslućuje krovom koji lebdi nad voluminoznim interijerom (slika 3.).

Na slici 3. je vidljiv i poseban vizualni efekt u noćnom ambijentu zgrade koji daje osvjetljenje staklenih ploha preko kojih se svjetlost isijava u okolni prostor, dok dnevna svjetlost velikim površinama staklenih ploha krova i pročelja ulazi u zgradu.

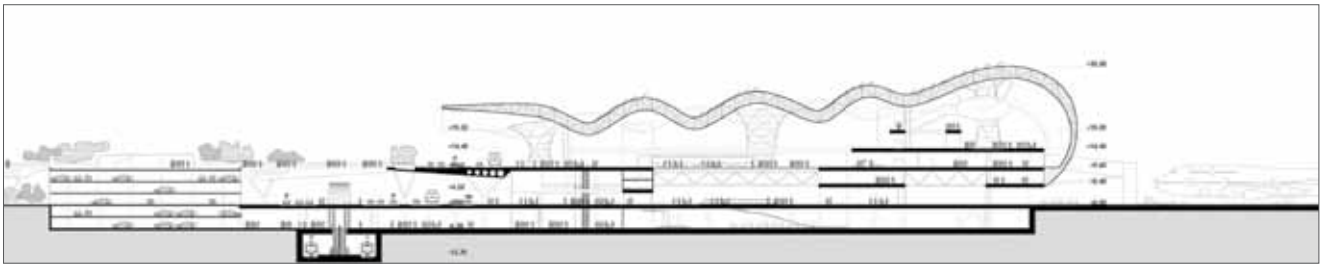
Osnovni je oblik u gornjoj i donjoj ravnini rešetke istokračan trokut koji u svojoj tlocrtnoj projekciji ima osnovicu 7,2 m i stranice 8,05 m. Ove dimenzije uvjetuju osnovni raster zgrade i izdanaka. Valovita se struktura krova prema aerodromskoj strani zgrade polako smiruje, a konačno se valjkasto spušta i zavija prema tlu oblikujući na taj način lice zgrade. U ovom je prostoru zgrada najviša, a zbog izbačenosti prema pisti ponovno je naglašen osjećaj lebdenja. Prostor je dodatno obogaćen i povišenim restoranom na središnjem dijelu iz kojeg se pruža jedinstveni vidik na pistu i čitav terminal pa svojim položajem privlači ljude. Valjkasto lice zgrade u kontinuitetu se nastavlja i pretvara u izdanke (slika 4.) - cjevaste strukture lijevo i desno od glavne zgrade, visinski podijeljene u tri nivoa – gornji nivo za odlaske, donji nivo za dolaske, a srednji za transfer putnika. Izdanci širine 14 m su po dužini promjenjive visine, nastavljajući tako ustaljenu valovitost glavne zgrade. Zapadni je prostorni izdanak dug 353 m, a istočni je kraći i iznosi 151 m jer je predviđeno da se kasnije može dodatno produžiti u skladu s budućim potrebama.

Osnovne su funkcije zračne luke odlazak, dolazak i transfer putnika, a organizacija tih funkcija složena je po okomitoj raspodjeli (slike 5. i 6.). Sve su razine međusobno povezane pokretnim stepenicama i dizalima u jezgrama. Odlazna razina je po visini najviša, a pristupa joj se s vanjske strane preko prometnica na rampama pod nagibom od 6%. Također, ova razina je povezana trima pješačkim mostovima s aerodromskim hotelom i garažom (slike 2. i 5.). Na odlaznoj razini se u prednjem dijelu nalaze dva otoka s *check in* šalterima. Dva šaltera za kontrolu *boarding-passa*, putovnica i sigurnosnu kontrolu nalaze se nešto dalje prema mjestu odlazaka. Odlazna zona se izvan zgrade dalje nastavlja na gornju razinu *pierova*. U zoni odlazaka nalaze se trgovine i *snack* barovi. Središnji je restoran iznad ove razine s pogledom na nju, a iznad njega se nalazi još jedan javni prostor koji je visinski najbliži konstrukciji krova pa se ovdje očekuje zadržavanje ljudi radi doživljaja estetike fluidnog krova. U najvišoj točki glavne zgrade nalazi se elipsoidno tijelo u kojem su smještene kontrolne funkcije aerodroma. S odlazne razine moguće je izići i na vanjske šetnice, zelene krovove i terase s kojih se pružaju prekrasni pogledi prometa na pisti i slike Zagreba i Medvednice u pozadini.

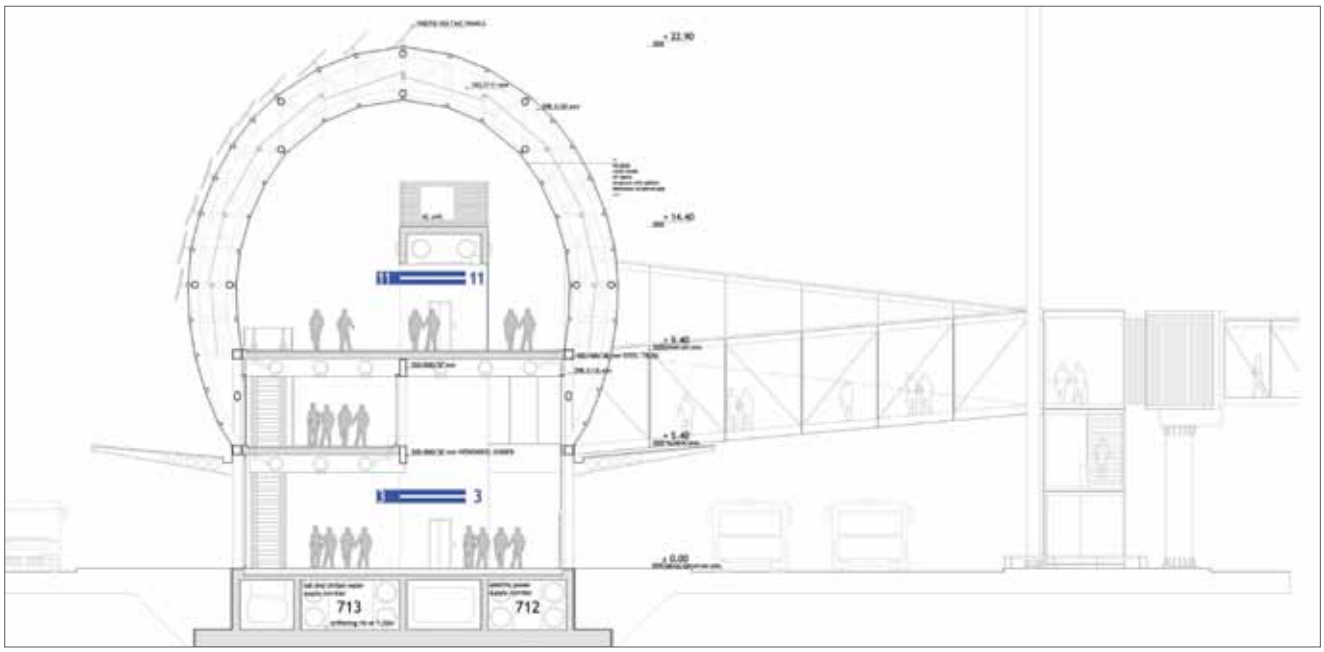
Transfer razina primarna je razina za sve putnike u dolasku. S ove razine putnici se dalje odvajaju. Oni koji ostaju upućuju se na donju razinu na kojoj preuzimaju prtljagu i obavljaju carinsku kontrolu. Putnici koji presjedaju, u transfer zoni obavljaju sve potrebne radnje i dalje se upućuju prema gore na odlaznu razinu. Za ukrcaje u avione s velikim brojem putnika, transfer razina također može poslužiti i kao odlazna razina.

Dolazna razina podijeljena je na sekcije za putnike na domaćim i međunarodnim letovima. U dolaznu razinu stiže se s pokretnim stubama s transfer razine ili izravno autobusima iz aviona. Nakon ulaska u dolaznu zonu, putnici se usmjeravaju prema voluminoznom prostoru preuzimanja prtljage. Međunarodni putnici u nastavku ulaze u prostor carinske kontrole, a zatim svi dolaze u izlazni veliki hal gdje dalje idu prema autobusnim stanicama ili taksi-stajalištima. Putnici koji dalje odlaze automobilima ili lakom željeznicom spuštaju se pokretnim stubama jednu razinu niže gdje se nalazi ulaz u garažu i tramvajsku stanicu ili buduću stanicu podzemne željeznice.

Najniža, podrumska razina predviđena je za prtljagu. Glavni dio razine za prtljagu služi za manipulaciju, automatsko sortiranje, kontrolu i dostavu. U ovu razinu prtljaga dolazi s *check in* šaltera iz odlazne razine preko vertikalnih blokova. Prema zrakoplovu i od zrakoplova prtljaga se isporučuje



Slika 5. Konstrukcija i vertikalni funkcionalni raspored terminala i okolnog područja



Slika 6. Presjek kroz *pier* - konstrukcija i vertikalni funkcionalni raspored

vučnim vozilima preko rampe pod nagibom od 6,5%. Prometno je glavna zgrada terminala povezana cestovnim i tračničkim vezama izravno s užim središtem grada. Na istočnu obilaznicu Velike Gorice zgrada je spojena novom Alejom platane i paralelno s njom južnije s Alejom hrastova. Između ovih dviju aleja slobodan je prostor širine 150 m predviđen za izgradnju Airport Cityja – poslovne, turističke i komercijalne zone (slika 1.). Ovdje bi bili smješteni kongresni centri, hoteli, trgovački centri i poslovni uredi. Laka željeznica (tramvaj) dolazila bi do aerodromske zgrade s Glavnog kolodvora preko Domovinskog mosta, a buduća linija podzemne željeznice mogla bi je izravno povezati najkraćim pravcem sa središtem Zagreba. Svi cestovni prilazi aerodromskoj zgradi regulirani su kružnim tokovima sa spomenutih aleja, a vertikalno su oni raspleteni na odlaznu (+9,6 m) i dolaznu (+/-0,0 m) razinu. Parkirni i garažni prostor nalazi se između Aleje platane i aerodromskog kompleksa i mostovima je povezan s odlaznom razinom.

4. Konstrukcija

Iz dosada iznesenog može se zaključiti da su sve nosive strukture u službi arhitektonskog oblikovanja i funkcionalnog iskorištavanja prostora i energije. No, unatoč tome nisu u podređenom položaju već naprotiv, uspješno oblikovanje proizlazi iz racionalnosti i transparentnosti puta prijenosa opterećenja od krova do temelja. Upravo je zato za glavnu nosivu konstrukciju izabran čelik kao materijal s visokom arhitektonskom vrijednošću i velikim mogućnostima nosivosti. Pri koncipiranju nosivog sustava krovišta proučeni su primjeri iz literature koja se bavi sličnim rešetkastim prostornim konstrukcijama [2, 3, 4, 5].

4.1. Aerodromska zgrada i krovište

Što se tiče nosive konstrukcije, aerodromska je zgrada višeetažna hibridna građevina. Ukupna visina, od temeljne plohe do vrha krovišta, iznosi 42,5 m. Nosiva je konstrukcija potpuno usklađena s funkcijom pojedine etaže zgrade. U funkcionalnom se pogledu razlučuju hodne plohe na sljedećim razinama:

- kota -6,0 m: servisna razina, vrh temeljne ploče
- kota +/-0,0 m: dolazna razina
- kota +5,4 m: razina transfera
- kota +9,4 m: razina odlaska (slika 7.)
- kota +14,4 m: čekaonice i usluge (vidikovci, restorani, trgovine)
- kota +19,2 m: javna šetnica, vidikovac
- kota + 25,0 m: razina nadzora aerodromskih službi.

Temelj zgrade je temeljna betonska ploča ukupne širine (poprečni smjer, okomito na *pier*) 133,0 m i duljine (uzdužni smjer, u smjeru *piera*) 144,0 m. U nastavku zgrade prema

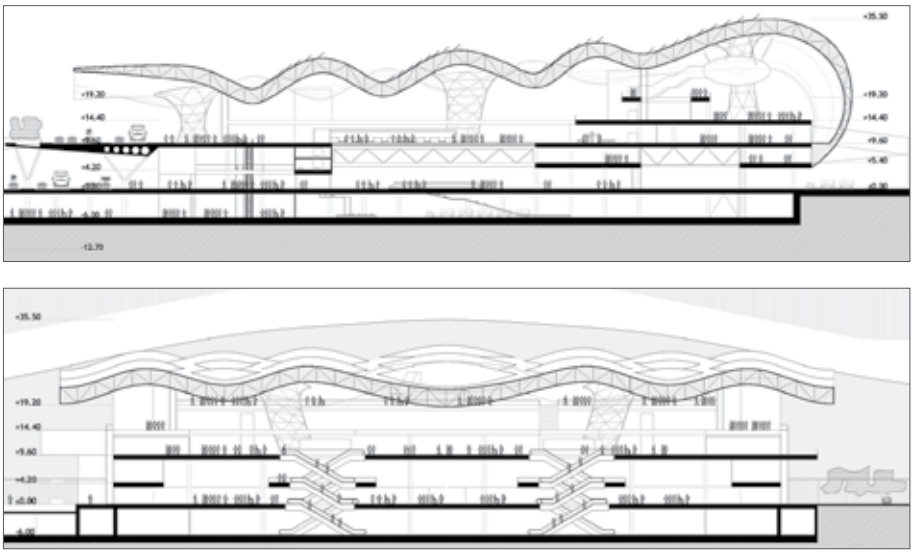
Slika 7. Tlocrt zgrade (u odlaznoj razini)

aerodromskom naselju izvode se građevine lokalnih komunikacija (stanica podzemne željeznice, garaže, pješački prolazi i mostovi, automobilski pristupi ...). Temeljna je ploča debljine 1,0 m, a dno joj je na koti -7,0 m od kote aerodromske piste (+/-0,0 m). Na razini vrha temeljne ploče (kota -6,0 m) nalazi se servisni prostor (zona prtljage i usluga).
Na koti +0,0 m je dolazna aerodromska razina. Na ovoj razini zgrade izvodi se betonski roštiljni sustav stropa. Vertikalna opterećenja preuzimaju betonski zidovi četiriju betonskih jezgri i betonski stupovi 0,8 m x 0,8 m. Stupovi su u rasteru 7,2 m x 14,4 m. Četiri vertikalne betonske jezgre, koje se sastoje od po tri zida, osiguravaju horizontalnu krutost etaže. Širina pojedinog zida je 7,2 m. Jezgre su simetrično raspoređene na krajeve zgrade u uzdužnom smjeru i pri krajevima zgrade u poprečnom smjeru. Podne konstrukcije na razinama +5,4 m i +9,6 m formiraju hibridni sustav. U prostoru sredine zgrade, u transfer razini, pod obadviju etaža bit će od prozirnih ploča (staklo). Nosiva konstrukcija ovih ploča su čelične rešetke raspona 43,2 m na međusobnom razmaku od 14,4 m. Visina ovih rešetki je 4,2 m. Pojasi su sandučasti, širine 800 mm i visine 400 mm. Debljine stijenki su do 60 mm. Dijagonalna ispuna V oblika je od valjanih HE 700 profila ili sličnih zavarenih profila. Zbog potrebe slobodne komunikacije autobusa na koti +0,0 m, koji ostvaruju unutarnji autobusni promet aerodroma, u dijelu zgrade uz *pier* (pristupni hodnik) nije moguće izvesti stupove. Zbog toga se prostor premošćuje čeličnim rešetkama raspona 21,6 m, na razmaku od 14,4 m. Visina rešetki je 4,2 m, a gornje se plohe poklapaju s hodnim plohama na kotama +5,4 i +9,6 m. Pojasi rešetke su sandučasti, širine 600 mm i visine 400 mm; debljine stijenki su do 40 mm. Dijagonalna je ispuna od valjanih HE 500 profila ili sličnih zavarenih profila. Podovi su od betonskih ploča u kombinaciji s dijelovima od prozirnih (staklenih) ploča. U ostalom su dijelu etaža +5,4 m i +9,6 m stropne ploče betonske, na betonskim roštiljima i betonskim stupovima odnosno jezgrama. Nosiva konstrukcija na razini javne šetnice i vidikovca (kota +19,2 m) hibridna je konstrukcija od čelika, betona istaklenih hodnih ploha. Prethodno opisane nosive konstrukcije zgrade izrazito su definirane funkcijom. Posebnost im se naglašava u zahtjevima primjene prozirnih hodnih ploha. Uvjeti se ispunjavaju primjenom čeličnih konstrukcija u pojedinim dijelovima, uključujući čelične rešetke u punoj visini kata.

Krovna je konstrukcija aerodromske zgrade integralno arhitektonsko-konstruktorsko rješenje. Odlikuje se činjenicom da je osnovni dojam pojavnosti složene zgrade ostvaren nosivom konstrukcijom. Postizanje oblika (volumena) građevine ostvareno je primjenom suvremenih softverskih paketa. U iterativnom postupku iznalaženja optimalnog volumena varirani su pojedini elementi po obliku i veličini (broj valova, odnos najmanje i najveće visine, pozicije stupova, ...). Nakon provedenih iteracija i usporedbi pojedinih rješenja usvojeno je konačno, projektno rješenje krovišta.

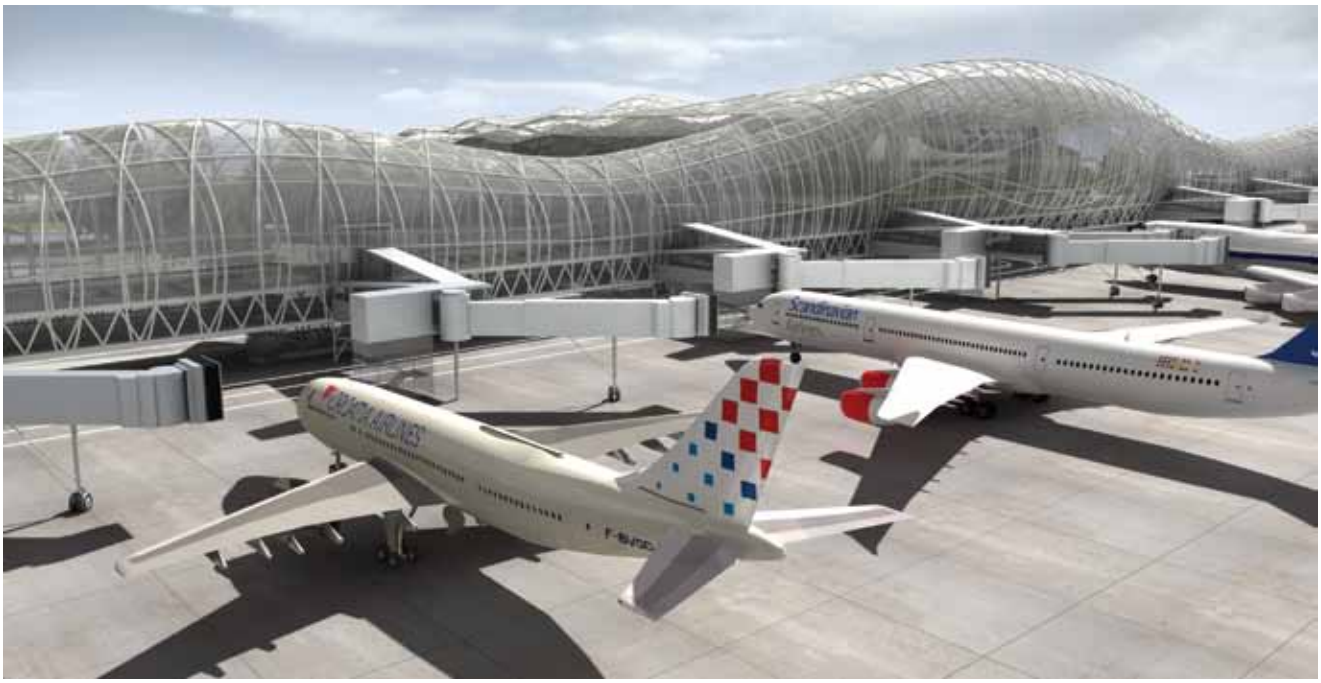
Krovište je prostorna ljuska koja sjedinjuje krovnu plohu i pročelje okrenuto prema aerodromskoj pisti. Ovo je pročelje okrenuto prema sjeveru, odnosno gradu Zagrebu. Ukupna tlocrtna mjera krovišta aerodromske zgrade je 165,0 m poprijeko na *pier* i 155,0 m u smjeru *piera*. Najveća visina zgrade je 35,5 m (slika 8). Na slici 9. prikazan je sjeverni i južni pogled na terminal. Sjeverni pogled sa piste na zgradu terminala i pristupne rampe prikazan je na slici 10. Ljuska je rešetkasta čelična konstrukcija nazivne visine 3,0 m, a na mjestu trubastih stupova ova se visina povećava. Gornja i donja ploha ljuske su trokutne štapne konstrukcije, tako da su štapovi gornje i donje plohe u tlocrtu podudarni. Tlocrtni razmak čvorova je 7,2 m što je osnovni modul zgrade. Rubne plohe ljuske međusobno su spojene dijagonalama raspoređenim u V obliku.
Vertikalna opterećenja krovišta prenose se na šest čeličnih rešetkastih stupišta, izvedenih u obliku dvostrukog lijevka ili trube, spojenih na mjestu najmanjeg promjera, približno na sredini visine stupa. Iz dojmovnih razloga stupovi su koso položeni.

Oblik je iterativno određen, bez matematičke zakonitosti. Najmanji je promjer stupa Φ=7,2 m. Cijevi se na koti +9,6 m oslanjaju na međukatnu konstrukciju. Štapovi stupišta su čelične cijevi, približno Φ 406,4 mm x 20 mm. Osim ovih šest stupova krovna rešetkasta ljuska izravno ili preko spojnih štapova oslanja se i na četiri komunikacijske (stabilizacijske) armiranobetonske jezgre. Jezgre su raspoređene uz poprečne rubove zgrade i protežu se od temeljne ploče. Prednja strana zgrade (pročelje prema pisti) stopljena je s bočnom stranom *piera* i oslanja se na



Slika 8. Poprečni (gore) i uzdužni (dolje) presjek zgrade

Slika 9. Sjeverni (gore) i južni (dolje) pogled na terminal



Slika 10. Sjeverni pogled s piste na zgradu terminala i pristupne rampe

uzdužnu međukatnu čeličnu rešetku *piera* na koti +5,40 m. Horizontalna stabilnost krovišta zgrade osigurava se hibridnim sustavom koji čine šest rešetkastih stupišta (trube), četiri betonske jezgre i betonska konstrukcija zgrade na koju se krovište spaja na koti +5,40 u osi nosive čelične rešetke *piera*.

4.2. Pristupni hodnik - *pier*

Oblikovanje volumena pristupnog hodnika (*piera*) integralno je riješeno s rješenjem aerodromske zgrade. Funkcionalni prostori hodnika na kotama +5,4 m i +9,8 m obučeni su nosivom čeličnom konstrukcijom. Cijela građevina hodnika izdignuta je na čelične stupove i betonske jezgre dobivene na mjestima stubišta, tako da je prostor na razini +0,0 m maksimalno prohodan.

Nosiva čelična konstrukcija krovišta *piera* obuhvaća dvije etaže pristupnih hodnika, tako da su krov i pročelja sjedinjeni. Širina prostora je 14,4 m. Zajedno s uključenim krovištem aerodromske zgrade, duljina krovišta *piera* je 670,0 m. Visina je konstrukcije promjenjiva do razine visinskih kota od +20,2 m do +24,7 m u prostoru *piera* pa do najviše +35,5 m u prostoru zgrade.

Konstrukciju čine lučni rešetkasti nosači u tlocrtu ukriženi. Svaki luk tlocrtno čini hipotenuzu trokuta s katetama 7,2 m (u smjeru *piera*) i 14,4 m (poprijeko na *pier*). Statička visina rešetkastog luka je 1,30 m. Pojasi su od čeličnih cijevi, približno Φ 298,5 mm x 20 mm, a dijagonale su od cijevi približno Φ 193,7 mm x 11 mm.

Lukovi se oslanjaju na bočne međukatne čelične rešetke *piera*, s donjim pojasom na koti +5,40 m i gornjim pojasom na koti +9,80 m. Svaki se luk s vanjskim pojasom priključuje na donji pojas međukatne rešetke, a unutarnji pojas završava u gornjem pojasu međukatne rešetke (slika 6.).

Bočne čelične rešetke su raspona 28,8 m. Statička im je visina 4,20 m (međukatna visina). Sastoje se od pojasa, koji su čelični sanduci vanjskih izmjera 400 mm x 400 mm i dijagonalne V ispune od cijevi približno Φ 298,5 mm x 16 mm.

Betonska katna ploča debljine 25 cm spaja se bočno na čelične pojase rešetke. Spoj se ostvaruje ležajnim limom Φ 100 mm x 20 mm i čepastim moždanicima Φ 22 mm x 200 mm.

Iskazanim sustavom osiguran je prijenos vertikalnih opterećenja (rešetka) i horizontalnih opterećenja (međukatna betonska ploča). Vertikalna opterećenja s bočnih rešetki predaju se na čelična rešetkasta stupišta izvedena u prostoru jezgri (vertikalna komunikacija). Prijenos horizontalnih opterećenja u temelje ostvaruje se betonskim jezgrama koje su na razmaku od najviše 28,8 m na mjestima stubišta.

4.3. Statički proračun

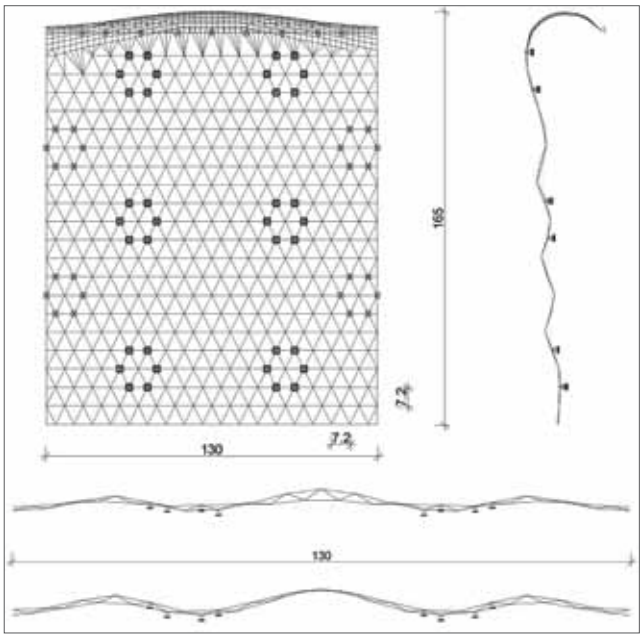
Na razini idejnog rješenja zgrade načinjen je grubi statički proračun krovišta. Proračun je proveden izradom računalnoga modela krovne ljuske prikladnoga za analizu vertikalnih opterećenja. Ljuska je oslonjena na ležajeve koji predstavljaju pojedine cijevi stupišta i ležajeve na betonskim jezgrama. Najveći je razmak stupnih mjesta 57,6 m. Proračunski je model prikazan na slici 11., a dio rezultata proračuna na slici 12.

Najveći momenti savijanja ljuske jesu: *min* M_{yy}=-400,0 kNm/m i *min* M_{xx}=-410,0 kNm/m. Preračuna li se utjecaj u pojasne štapove rešetke dobije se najveća sila u štapu od 1.658,0 kN ~ $N_{E,d}$.

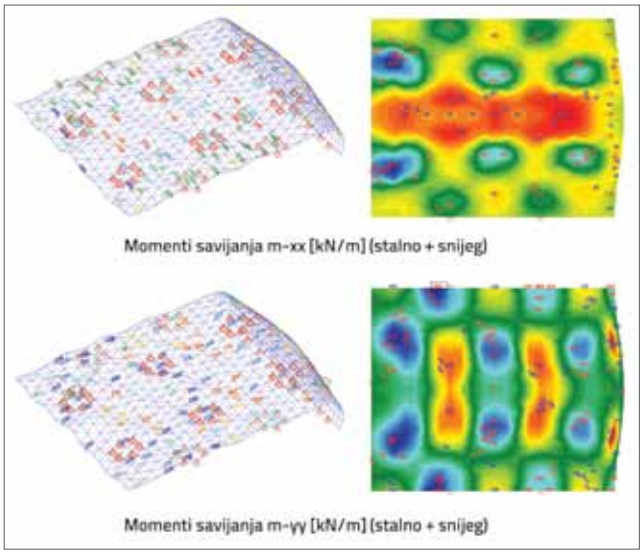
Štap od cijevi Φ 219,1x16,0 mm, s duljinom izvijanja od 8,04 m, ima otpornost $N_{R,d}$ = 1.218,0 kN. Štapovi rešetke uglavnom su od cijevi Φ 219,1x16,0 mm, a u okolici ležajeva štapovi se pojačavaju i usklađuju s profilima štapova stupišta. Ove su dimenzije generalno usvojene u prvoj etapi proračuna.

Naknadno je proveden detaljniji proračun koristeći se modelom sa štapnim elementima rešetke koji uključuje oba pojasa i ispunu rešetke (slika 13.). Za analizu je korišten računalni program Sofistik. Dimenzioniranje štapova rešetke provedeno je za granična stanja nosivosti koja su uključivala mjerodavne kombinacije sljedećih opterećenja: vlastita težina glavne nosive rešetke (70 kg/m²), dodatno stalno (potkonstrukcija nosača pokrova, pokrov i oprema – približno 75 kg/m²), snijeg (karakteristično opterećenje od 1,2 kN/m²), vjetar (referentna brzina 22 m/s), temperatura (+17 °C, -15 °C) i potres (akceleracija 0,21g, faktor važnosti 1,3). Postupkom dimenzioniranja definirane su kritične duljine izvijanja pojedinih štapova i kritična sila izvijanja. Dimenzije štapova su optimizirane tako da su nekima smanjene debljine stijenki, a nekima povećane.

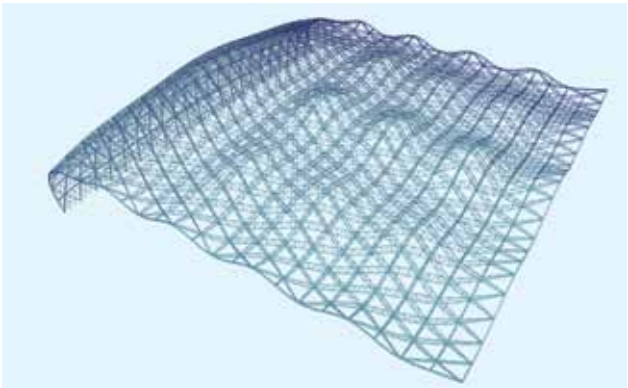
Kod pojedinih su štapova (uz stupna mjesta) povećani i promjeri cijevi. Štapovi pojasa rešetke su tako definirani od Φ 219.1x8.8 do Φ 273.0x28.0 mm. Štapovi ispune definirani su od Φ 139.7x6.3 do Φ 152.4x14.2 mm. Za granično stanje uporabljivosti provjereni su progibi. Mjerodavne najveće progibe daje rijetka kombinacija i oni iznose oko 7 cm u sredini raspona.



Slika 11. Konstrukcijski model rešetkaste ljuske krovišta



Slika 12. Rezultati statičkog proračuna idejnog rješenja krovišta zgrade



Slika 13. Prostorni štapni model čelične rešetke krovišta glavne zgrade

Prema provedenom računu djelovanja vjetra i potresa (horizontalna djelovanja) na zgradu izračunava se da je ukupna sila od djelovanja vjetra koja se raspoređuje na jezgre oko 6.890,0 kN, a ukupna sila od djelovanja potresa na čeličnu krovnu konstrukciju (bez utjecaja betonskih i čeličnih katnih konstrukcija) od 1.700 kN do 2.700 kN po jezgri (ovisno o položaju jezgre u tlocrtu). Horizontalne sile od temperature iznose od 1.300 kN do 2.000 kN po jezgri. Elementi vertikalne stabilizacije nisu posebno proračunani, ali s obzirom na broj i raspored ležaja zaključuje se da je konstrukcija sposobna preuzeti ova djelovanja u uvjetima prihvatljivih deformacija.

5. Zaključak

Graditeljska djelatnost ostvaruje proizvode koji svoju funkciju prezentiraju kroz dulje razdoblje. Zbog toga su građevine ogledalo trenutka građenja i uključena je cjelokupna tehnička i društvena kultura prostora u kojem se ona ostvaruje. Takvo ostvarenje ostaje zapis u vremenu i prostoru i reprezentira duhovnost ljudi koji su gradili i koristili se građevinom.

Pri koncipiranju aerodromske zgrade (i ostalog aerodromskog i okolnog aerodromskog prostora) primijenjene su vrhunske spoznaje o urbanizmu i arhitekturi.

Tehnička sredstva kojima su ostvareni zahtjevi oblikovanja pripadaju skupini najvrjednijih znanja današnjeg doba. Biranje i zadavanje vodećih parametara za formiranje volumena zgrade te potpunost i preciznost računalnim programima dobivenih konačnih rješenja slika su današnje mogućnosti interakcije između umjetničkih zamisli i tehnika i fleksibilnosti inženjerske djelatnosti. Prikazanom građevinom optimalno je iskorištena simbioza dviju srodnih struka – arhitekture i inženjerstva.

LITERATURA

[1] Kincl, B., Neidhardt, V., Radić, J.: Natječajni rad "Zagreb Airoprt - New Passenger Terminal", kolovoz 2008.

[2] Handbook of Structural Engineering, Second Edition Edited by Wai-Fah Chen and Eric M . Lui, CRC Press, 2005.

[3] Ramaswamy, G.S., Eekhout, M., Suresh, G.R.: *Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames*, Thomas Telford Publishing, London, 2002.

[4] Proceedings of Fourth International Conference on Space Structures, University of Surrey, Guildford, UK, (eds. Parke, G.A.R., Howard, C.M.), Thomas Telford Services, September 1993.

[5] Chilton, J.: *Space Grid Structures*, Arhitectural Press, Oxford, Woburn, 2000.